



УДК 621.313.3

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПО ИСЛЕДОВАНИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЧАСТОТНОГО ПРИВОДА С ПИТАЮЩЕЙ СЕТЬЮ И ДВИГАТЕЛЕМ

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL FOR STUDY OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF THE FREQUENCY-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE WITH THE POWER SUPPLY AND ELECTRIC MOTOR

Плотников Юрий Валерьевич, канд. техн. наук, доцент каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: yu.v.plotnikov@urfu.ru. Тел.: +7 (343) 375-46-46

Перженитца Сергей Михайлович, магистрант каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: perzhenitsa@inbox.ru. Тел.: +7 (343) 375-46-46

Юнусов Рустам Мингайсинович, магистрант каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: yrm100291@yandex.ru. Тел.: +7 (343) 375-46-46

Iurii V. Plotnikov, Cand. Sc., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: yu.v.plotnikov@urfu.ru. Ph.: +7 (343) 375-46-46

Sergey M. Perzhenitsa, Student, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: perzhenitsa@inbox.ru. Ph.: +7 (343) 375-46-46

Rustam M. Yunusov, Student, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: yrm100291@yandex.ru. Ph.: +7 (343) 375-46-46

Аннотация: В статье рассматривается задача построения математической модели для исследования электромагнитной совместимости частотно-регулируемого электропривода с питающей сетью и двигателем. Модель строится на основе элементов из библиотеки SimPowerSystems приложения Simulink пакета MATLAB. Приводятся примеры результатов моделирования и оценки электромагнитной совместимости.

Abstract: The article discusses the task of constructing a mathematical model for study of electromagnetic compatibility of frequency-controlled electric drive with the power supply and electric motor. The model is based on elements from the SimPowerSystems Library of MATLAB Simulink application. Examples of the simulation results of and estimation of electromagnetic compatibility are shown.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость; частотно-регулируемый электропривод; оценка гармонического состава, THD.

Key words: electro-magnetic compatibility; frequency-controlled electric drive; estimation of the harmonic content total harmonic distortion.

ВВЕДЕНИЕ

Проблеме электромагнитной совместимости в последнее время уделяется все больше внимания как в России, так и за рубежом [1, 3, 4]. Основная причина повышенного интереса заключается в

том, что все больше современных систем электропривода на основе полупроводниковых преобразователей используется на промышленных предприятиях и в сфере ЖКХ. При этом, в настоящее время наиболее распространенным является частотно-регулируемый электропривод

на базе общепромышленных асинхронных двигателей. Помимо широко известных достоинств частотного привода известно, что он оказывает негативное влияние на питающую сеть и на двигатель. Влияние на сеть выражается в искажении формы питающего напряжения, которое зависит от мощности электропривода и внутреннего сопротивления сети. Влияние преобразователя на двигатель выражается в его повышенном нагреве за счет пульсаций тока статора, которые возникают при использовании широтно-импульсной модуляции (ШИМ) выходного напряжения инвертора.

Несмотря на то, что качественно влияние преобразователя на сеть и на двигатель хорошо изучено, получение количественных показателей представляет определенные трудности. Это связано с использованием сложных математических моделей, которые должны учитывать дискретность преобразователя и наличие внутреннего сопротивления в питающей сети. Аналитическое решение этой задачи в большинстве случаев является достаточно сложным и трудоемким процессом. Поэтому, в данной статье рассматривается вопрос построения математической модели по исследованию электромагнитной совместимости преобразователя частоты с питающей сетью и двигателем. [2] В качестве основы модели планируется использовать библиотеку SimPowerSystems приложения Simulink пакета MATLAB, которая имеет готовые необходимые элементы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задачей данного исследования является разработка математической модели по исследованию электромагнитной совместимости частотного привода с питающей сетью и двигателем.

Использование данного инструмента позволит существенно упростить расчеты и провести анализ переходных процессов в электроприводе при различных условиях работы электродвигателя и параметрах питающей сети.

Объектом изучения частотно-регулируемый электропривод, который получает питание от питающей сети с ненулевым внутренним сопротивлением. Основными параметрами питающей сети, которые задаются в модели, являются напряжение U , частота f и внутреннее сопротивление R . При выборе уровня напряжения остановимся на величине $U = 400$ В, так как это соответствует напряжению питания стендов в лабораториях кафедры, где планируется проведение экспериментальных исследований. Частота сети стандартная и составляет $f = 50$ Гц. Внутреннее активное сопротивление сети R устанавливается равным 0,5 Ом. Величина сопротивления сети R достаточна велика, но такой

выбор обусловлен задачей, согласно которой должны быть наглядно видны изменения сети при влиянии на нее частотного привода с небольшой мощностью.

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Математическая модель, представленная на рис. 1, включает в себя источник переменного трехфазного напряжения с внутренним активным сопротивлением R и индуктивностью L . [3,4] Используется схема соединения источника напряжения в звезду с нейтральным проводом.

Для питания автономного инвертора напряжения используется неуправляемый выпрямитель на основе шестипульсовой мостовой схемы выпрямления.

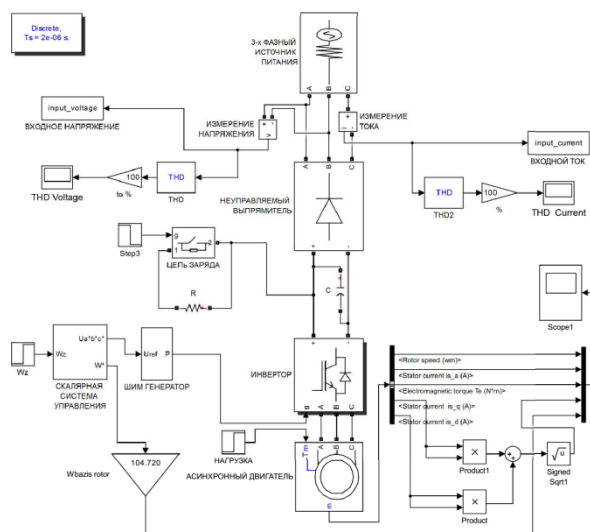


Рис. 1. Математическая модель по исследованию ЭМС в пакете Matlab Simulink

В схеме преобразователя предусмотрена цепь заряда конденсатора, подключенного к звену постоянного тока. Когда напряжение на конденсаторе достигнет определенного значения, которое обычно составляет порядка 750 В, открывается ключ и конденсатор разряжается на тормозном сопротивлении R_T .

Для формирования напряжения на двигателе используется автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией на базе идеальных IGBT транзисторов без учета падения напряжения.

Математическая модель асинхронного двигателя базируется на общепринятых допущениях [5]. Обширная библиотека Matlab включает в себя множество «готовых» двигателей зарубежных производителей с известными параметрами схемы замещения, но также предоставляет возможность задавать параметры вручную.

Для создания момента статического сопротивления на валу двигателя в модели предусмотрен специальный блок, в котором

задается величина статического момента и время его приложения.

За формирования сигналов управления ключами инвертора напряжения отвечает блок ШИМ генератор (PWM Generator) из стандартной библиотеки Matlab Simulink. В качестве сигнала задания используется сигнал U_{ref} , который формируется на выходе скалярной системы автоматического управления (рис. 2).

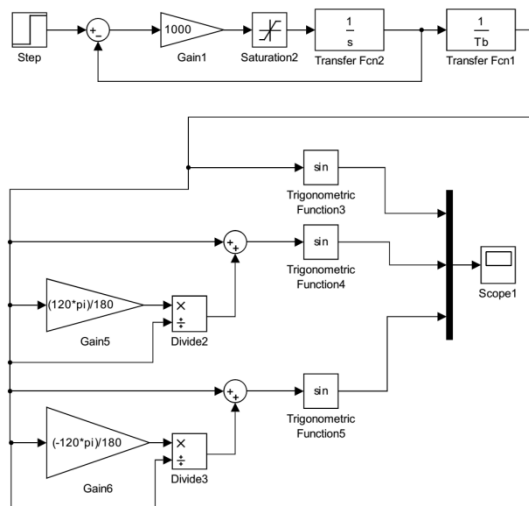


Рис. 2. Функциональная схема скалярной системы управления в пакете Matlab Simulink

Скалярная система управления включает в себя: задатчик интенсивности первого порядка, блок формирования угла и блок формирования трехфазной системы напряжений управления, сдвинутых во времени на угол в 120 градусов.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве примера на рис. 3. представлен процесс запуска частотного электропривода от задатчика интенсивности. При моделировании использовался асинхронный двигатель с номинальной мощностью $P_n=2,2$ кВт. После завершения процесса запуска электропривода к двигателю была приложена номинальная нагрузка.

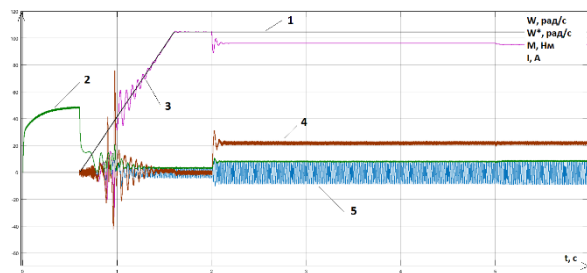
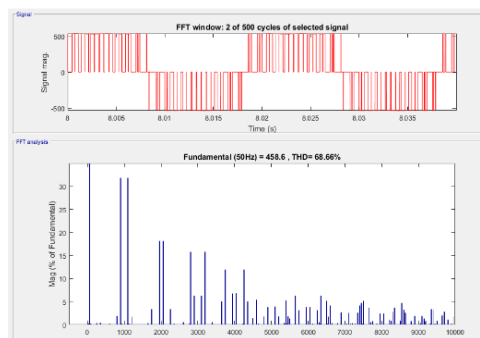


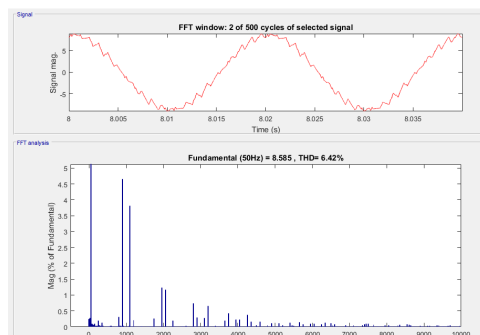
Рис 3. Процесс пуска частотного электропривода с задатчиком интенсивности

1 – задание на скорость, 2 – вектор тока статора, 3 – скорость, 4 – электромагнитный момент, 5 – ток статора

Процесс запуска начинается после завершения процесса заряда конденсатора в звене постоянного тока преобразователя частоты. Несмотря на то, что угловая скорость двигателя во время пуска изменяется практически по линейному закону, в форме момента наблюдаются существенные колебания, которые являются неотъемлемой частью скалярных разомкнутых систем управления. При набросе номинальной нагрузки скорость двигателя падает на величину номинального скольжения и после завершения переходного процесса и производится оценка влияния преобразователя на сеть и на двигатель, а также снятия осциллограмм форм напряжений и токов, которые приведены далее. В данной статье рассмотрены варианты работы преобразователя с частотой ШИМ 1 кГц и 2 кГц, а также работа при различных внутренних сопротивлениях сети 0.5 Ом и 0.05 Ом. Ёмкость конденсатора в цепи заряда при этом составляет 300 мкФ. Режим предварительной зарядки конденсатора до номинального напряжения звена постоянного тока при моделировании не рассматривается, считаем, принимаем, что ёмкость заряжена до установившегося напряжения. В качестве результатов моделирования получаем графики тока и напряжения и соответствующие им диаграммы спектрального анализа. [1]

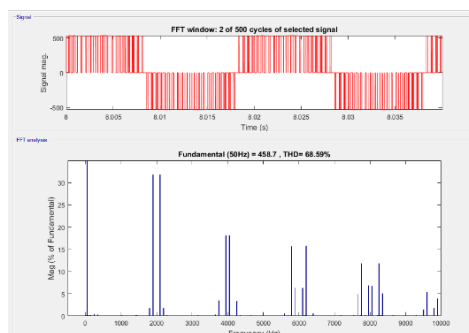


а) График и спектральный анализ выходного напряжения

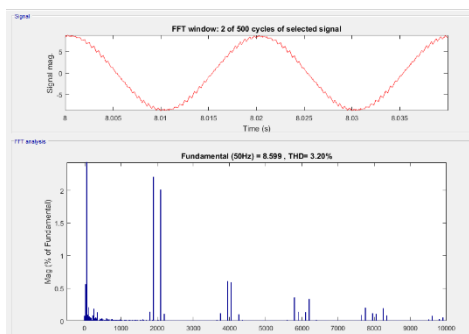


б) График и спектральный анализ выходного тока

Рис4. Форма напряжения и графики тока в установившемся режиме при частоте ШИМ генератора 1 кГц

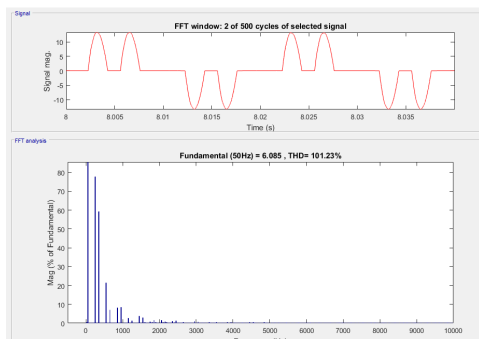


а) График и спектральный анализ выходного напряжения

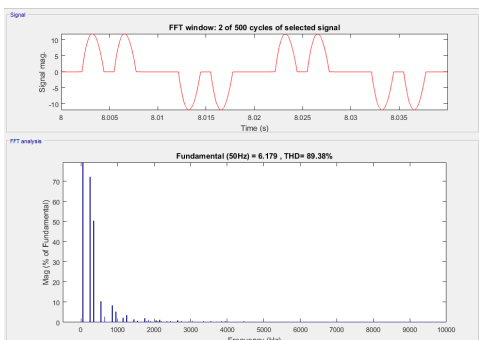


б) График и спектральный анализ выходного тока

Рис4. Форма напряжения и графики тока в установившемся режиме при частоте ШИМ генератора 2 кГц



а) Внутреннее сопротивление сети 0.05 Ом



б) Внутреннее сопротивление сети 0.5 Ом

Рис 5. Графики входного тока в установившемся режиме

Таблица 1.

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих

Частота ШИМ, кГц	THD U, %	THD I, %
1	68,66	6,42
2	68,59	3,20

Увеличение частоты ШИМ не сказывается на величине THD U, которая остается чрезмерно высокой, а коэффициент THD I при этом снижается. Увеличение частоты ШИМ сглаживает форму тока что благоприятно сказывается на работе двигателя. Коэффициенты THD за пределы допустимые ГОСТ 32144-2013 не выходят [6]. Модель решает все задачи, которые были возложены на нее и служит отличным инструментом для дальнейших исследований в области электромагнитной совместимости. Общими недостатками преобразователей частоты с амплитудным регулированием выходного напряжения тока являются отрицательное воздействие управляемого выпрямителя на питающую сеть переменного тока, низкий коэффициент мощности, генерация высших гармоник, некоторая неравномерность вращения и возникновения шагового режима работы двигателя при низких частотах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.В. Костылев, А.В. Кириллов, Д.В.Цибанов Процессы в полупроводниковых преобразователях с широтно-импульсной модуляцией. Екатеринбург: УрФУ, 2010. 71с.
2. В.Н. Горюнов, К.В. Хацевский, А.А. Шагаров, Д.А. Шагаров Исследование влияния полупроводниковых преобразователей на питающую сеть на основе математических моделей. Омский научный вестник №2 (120) 2013.
3. Герман-Галкин, С. Г. Модельное исследование основных характеристик силовых полупроводниковых преобразователей. Моделирование устройств силовой электроники / С. Г. ГерманГалкин // Силовая электроника. – 2008. – № 1. – С. 92–99.
4. Герман-Галкин, С. Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink. Лань, 2013. 448с.
5. Р.Т. Шрейнер Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654с.
6. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.